

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra obrábění a montáže**

## **NOVÉ TRENDY TESTOVÁNÍ OBROBITELNOSTI**

**New Trends in Machinability Testing**

**Student:**  
**Vedoucí diplomové práce:**

**Martin SOPUCH**  
**Ing. Lenka OČENÁŠOVÁ, Ph.D.**

**Ostrava 2009**

**Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 21.5.09 .....

.....  
Podpis studenta

## Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové (bakalářské) práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21.5.09

  
.....  
Martin Sopuch

Na hrázi 422  
Příbor  
742 58

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

SOPUCH, M. Nové trendy testování obrobitelnosti: Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 40 stran, 3 přílohy.

Bakalářská práce, vedoucí: Očenášová, L.

Tato bakalářská práce se zabývá obrobitelností technických materiálů. Obrobitelnost patří k nejdůležitějším technologickým vlastnostem a při vývoji nových materiálů je její zjišťování důležité. V této práci jsou popsány normativy obrobitelnosti, vlivy působící na obrobitelnost a je zde vysvětlena metodika zkoušek obrobitelnosti. Experimentální část se z hlediska rozsahu této bakalářské práce nezabývá přímo zkouškami obrobitelnosti, ale seznamuje s metodikou, která je využívána u zkoušek obrobitelnosti (měření řezných sil, měření drsnosti obrobené plochy, porovnání tvaru třísky). Jako vzorky byly použity tři různé materiály (dural, mosaz a ocel). V závěru práce je vyhodnocení experimentů a celkové shrnutí poznatků o obrobitelnosti technických materiálů v současné době.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

SOPUCH, M. New Trends in Machinability Testing: Department of Machining and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 40 pages, 3 supplements.

Bachelor thesis, head: Očenášová, L.

This bachelor thesis deals with machinability of engineering materials. Machinability belongs to most important technology characteristics and at new materials development is its recognition important. In this work is describe normative machinability, effects causing machinability and is there explain methods testing machinability. In term on range this bachelor thesis don't deal with experimental part directly machinability tests, but it acquaint with methodic, which is use by machinability tests (measure of cutting forces, surface quality and, compare chip form). As samples were use three different materials (dural, brass, and steel). In the conclusion of work are evaluation experiments and total summary observation about machinability technical materials today.

## OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ .....</b>	<b>- 2 -</b>
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>- 3 -</b>
<b>2. OBROBITELNOST MATERIÁLU .....</b>	<b>- 4 -</b>
2.1. NORMATIVY OBROBITELNOSTI .....	- 5 -
2.2. ZKOUŠKY OBROBITELNOSTI .....	- 8 -
2.2.1. Výpočtová metoda .....	- 8 -
2.2.2. Zkoušky obráběním.....	- 10 -
2.2.2.1. Dlouhodobá zkouška obrobitelnosti.....	- 11 -
2.2.2.2. Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti.....	- 13 -
2.3. VLIVY OVLIVŇUJÍCÍ OBROBITELNOST MATERIÁLU .....	- 22 -
2.3.1. Vliv chemického složení na obrobitelnost uhlíkových ocelí .....	- 23 -
2.3.2. Vliv struktury na obrobitelnost uhlíkových ocelí.....	- 24 -
2.3.3. Vliv mechanických a fyzikálních vlastností ocelí.....	- 24 -
2.3.4. Vliv tepelného zpracování a způsobu výroby na obrobitelnost ocelí.....	- 25 -
<b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>- 26 -</b>
3.1. TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY.....	- 26 -
3.1.1. Testované materiály .....	- 26 -
3.1.2. Použitý nástroj.....	- 27 -
3.1.3. Polotovary.....	- 28 -
3.2. ŘEZNÁ SÍLA PŘI SOUSTRUŽENÍ .....	- 28 -
3.2.1. Experimentální měření složek řezné síly .....	- 30 -
3.3. TVAROVÁNÍ TRÍSKY .....	- 30 -
3.3.1. Vzniklé tvary třísek při experimentech .....	- 31 -
3.4. DRSNOST POVRCHU OBROBKU.....	- 33 -
3.4.1. Naměřené hodnoty drsnosti Ra při experimentech .....	- 34 -
<b>4. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ .....</b>	<b>- 35 -</b>
4.1. ŘEZNÉ SÍLY .....	- 35 -
4.2. DRSNOST OBROBENÉ PLOCHY .....	- 36 -
<b>5. ZÁVĚR.....</b>	<b>- 38 -</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>- 39 -</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>- 40 -</b>

## Seznam použitého značení

Značení	Význam	Jednotka
CNC	počítačem řízený stroj	-
F	celková řezná síla	N
$F_c$	hlavní řezná síla	N
$F_f$	axiální složka řezné síly	N
$F_p$	radiální složka řezné síly	N
HB	tvrdost podle Brinella	HB
HM	hloubka zpevněné vrstvy	$\mu\text{m}$
K	koeficient přechování třísky	-
$K_v$	index obrobitelnosti	-
Ra	drsnost	$\mu\text{m}$
Rm	mez pevnosti	MPa
RO	rychlořezná ocel	-
SK	slinutý karbid	-
T	trvanlivost	min
VBD	vyměnitelná břitová destička	-
VB	opotřebení	mm
$a_p$	hloubka řezu	mm
$c_v$	konstanta	-
et	etalonový materiál	-
$f$	posuv	mm
h	hloubka	mm
iv	opravný součinitel	-
m	míra závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti	-
nv	exponent	-
q	qvocient geometrické řady	-
$r_t$	poloměr svinované třísky	mm
$r_\varepsilon$	poloměr zaoblení špičky	mm
$v_c$	řezná rychlost	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
$v_{T/VB}$	řezná rychlost $v_c$ při dané trvanlivosti	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
zk	zkoumaný materiál	-
$\varnothing$	průměr	mm
$\Theta$	střední teplota	$^{\circ}\text{C}$
$\alpha$	úhel hřbetu	$^{\circ}$
$\chi_r$	úhel nastavení hlavního ostří	$^{\circ}$
$\gamma_0$	úhel čela	$^{\circ}$
$\gamma_s$	úhel sklonu ostří	$^{\circ}$

# 1. Úvod

Obrobitelnost je důležitou technologickou vlastností materiálů, a proto je důležité její zjišťování. V dnešní době se vyvíjí stále nové konstrukční materiály, ať už jsou to tvrdé a pevné slitiny se špatnou obrobitelností či houževnaté automatové oceli s dobrou obrobitelností, které mají různé mechanické a fyzikální vlastnosti, chemické složení, mikrostrukturu a způsob výroby. Všechny tyto faktory ovlivňují obrobitelnost daného materiálu. Ve výrobě jsou na obrobitelnosti závislé kvalitativní parametry obráběcího procesu, parametry integrity povrchu a pro výrobu rozhodující ekonomické výsledky.

Význam obrobitelnosti stále roste při uplatňování automatizace a používání CNC strojů a obráběcích center. Při přesném určení obrobitelnosti materiálu můžeme nastavit takové řezné podmínky, při kterých dosáhneme např. optimální trvanlivosti nástroje, plynulost řezného procesu, zlepšení topografie obrobeného povrchu, zvětšení přesnosti obrábění, lepší využití obráběcího stroje, snížení výrobních časů a tím významné snížení nákladů na výrobu. Pro snadnější určování řezných podmínek v praxi udávají výrobci řezných materiálů tabulky doporučených hodnot parametrů obrábění (posuv, hloubka řezu, řezná rychlost, apod.) pro jednotlivé druhy a typy nástrojů či řezných destiček. Z těchto tabulek lze snadno zjistit řezné podmínky pro materiály zařazené v určité třídě obrobitelnosti a tím zajistí správné řezné podmínky a ekonomičnost výroby.

V této bakalářské práci se budu zabývat otázkou obrobitelnosti materiálu, způsoby testování obrobitelnosti a vlivy, které ovlivňují obrobitelnost. V experimentální části se budu zabývat metodikou měření řezných sil při soustružení, porovnáváním tvaru třísky a drsnosti obrobeného povrchu.

## 2. Obrobitelnost materiálu

Pod pojmem obrobitelnost rozumíme souhrnný vliv fyzikálních vlastností a chemického složení kovů na průběh a na ekonomické, popř. kvalitativní výsledky procesu řezání [1]. V technologii obrábění patří obrobitelnost k jedné z nejdůležitějších vlastností materiálů a je hlavním činitelem při volbě řezných podmínek u všech metod obrábění. Lze ji obecně posuzovat z hlediska vlivu materiálu obrobku na intenzitu otěru, energetické bilance procesu řezání a také jejich vlivu na proces tvoření třísky a vytváření nového povrchu na obrobku [1].

Existuje úzký vztah stupně obrobitelnosti kovů k velikosti jednotlivých faktorů, které jsou součástí procesu řezání, jako např. součinitel tření třísky po čele nástroje, plochy řezu na hřbetě břitu, velikost měrné deformační práce, stupeň zpevnění v odřezávané vrstvě materiálu, velikost mezních kluzných napětí ve střížné rovině a velikost jeho úhlu  $\beta$ , apod [1].

Obrobitelnost materiálů závisí na různých faktorech, z nichž nejdůležitější jsou:

- způsob výroby a tepelné zpracování
- mikrostruktura
- chemické složení
- fyzikální a mechanické vlastnosti
- metoda obrábění
- pracovní prostředí
- geometrie nástroje
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu

Podle charakteristiky se obrobitelnost a řezivost rozděluje na obrobitelnost absolutní a relativní. Nutno podotknout, že obrobitelnost a řezivost spolu úzce souvisí a řada kritérií obrobitelnosti je současně i kritérií řezivosti [1].

**Absolutní obrobitelnost** vyžaduje určit závislosti (vzorce) potřebné pro výpočet řezných sil, trvanlivost nástroje a drsnosti povrchu od parametrů řezání, tak i informace o tvaru třísky [2].

**Relativní obrobitelnost** je určována bezrozměrnými čísly, které udávají poměr velikostí určité veličiny, a sice poměr velikosti veličiny vztahující se k danému zkoumanému materiálu a velikost veličiny odpovídající etalonovému (referenčnímu) materiálu.



Obrobitelnost hodnotíme především z hlediska intenzity opotřebení bříty, dále též z hlediska teplotního, silového, technologického a kvalitativního. Nejčastěji vycházíme z intenzity opotřebení bříty [1].

Nejdůležitějším kritériem tohoto typu je komplexní Taylorův vztah. Dalšími kritérii jsou jednoduchý Taylorův vztah a hodnota řezné rychlosti  $v_T$  odpovídající určité trvanlivosti bříty, což patří do absolutní kategorie. K relativním charakteristikám, které vycházejí z intenzity opotřebení bříty, patří především index obrobitelnosti  $K_v$  (vztahy 2.1 a 2.2). [1]

$$K_v = \frac{v_{T/VB\,zk}}{v_{T/VB\,et}} \quad (2.1)$$

případně

$$K_v = \frac{c_{vzk}}{c_{vet}} \cdot T^{\left(\frac{1}{m_{et}} - \frac{1}{m_{zk}}\right)} \quad (2.2)$$

kde:

$v_{T/VB\,zk}$ .....řezná rychlost  $v_c$  při trvanlivosti  $T_n=15$  minut pro zkoušený materiál [ $m \cdot min^{-1}$ ]

$v_{T/VB\,et}$ .....řezná rychlost  $v_c$  při trvanlivosti  $T_n=15$  minut pro etalonový materiál [ $m \cdot min^{-1}$ ]

$c_v$  .....konstanta, řádová velikost konstanty je  $10^2 \div 10^3$  [-]

$T$ .....trvanlivost [min]

$m$ .....exponent (míra závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti) [-]

## 2.1. Normativy obrobitelnosti

Pokud je obrobitelnost posuzována hodnotou  $v_T$ , jedná se prakticky o vyhodnocování úběru obráběného materiálu (velikost objemu materiálu odebraná za jednotku času) pomocí daného nástroje při smluveném konstantním průřezu třísky, v daném řezném prostředí [1]. Pro vyhodnocení obrobitelnosti se technické materiály rozdělují do devíti základních skupin, které jsou označovány malými písmeny:

- a – litiny
- b – oceli
- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi)
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku)
- e – plastické hmoty
- f – přírodní nerostné hmoty
- g – vrstvené hmoty
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců

V každé skupině je vždy jeden materiál, který byl vybrán za etalon (např. pro oceli je to materiál 12050.1, pro litiny je to šedá litina 42 2420) a podle tohoto materiálu se stanovuje relativní obrobitelnost všech ostatních materiálů ve skupině. Tyto etalonové materiály mají své mechanické vlastnosti a chemické složení odpovídající normě. Podle hodnoty indexu obrobitelnosti  $K_v$  se materiály zařazují do tříd obrobitelnosti. Příklad dělení skupiny oceli na třídy, včetně hodnot  $K_v$  je uveden v tab.1 . Každá skupina je rozdělena na 20 tříd obrobitelnosti a číslo třídy se umísťuje před písmeno, které určuje danou skupinu materiálu např. 11a, 14b, atd.. Odstupňování střední hodnoty indexu obrobitelnosti v jednotlivých třídách je dáno geometrickou řadou s kvocientem  $q = 1,26$  (třída etalonového materiálu má hodnotu  $q = 1$ ), což znamená, že hodnota řezné rychlosti  $v_{cT}$  v dané třídě je vždy 1,26 krát vyšší (nižší), než hodnota  $v_{cT}$  v sousední třídě [1]. Materiály v třídách s nižším číslem, než má třída etalonového materiálu mají horší obrobitelnost než etalonový materiál a naopak. Nejhorší obrobitelnost v dané skupině má vždy materiál zařazený do třídy s nejnižším číslem a nejlepší s nejvyšším číslem.

**Tab 1.** Hodnoty  $K_v$  indexu obrobitelnosti pro jednotlivé třídy skupiny ocelí [1]

Třída	Kv			Třída	Kv		
	vyjádřeno kvocientem	střední hodnota	rozsah		vyjádřeno kvocientem	střední hodnota	rozsah
1b	$1,26^{-13}$	0,050	0,045-0,054	11b	$1,26^{-3}$	0,50	0,45-0,56
2b	$1,26^{-12}$	0,065	0,055-0,069	12b	$1,26^{-2}$	0,63	0,57-0,71
3b	$1,26^{-11}$	0,080	0,070-0,089	13b	$1,26^{-1}$	0,80	0,72-0,89
4b	$1,26^{-10}$	0,10	0,09-0,11	14b	$1,26^0$	1,00	0,90-1,12
5b	$1,26^{-9}$	0,13	0,12-0,14	15b	$1,26^1$	1,26	1,13-1,41
6b	$1,26^{-8}$	0,16	0,15-0,17	16b	$1,26^2$	1,59	1,42-1,78
7b	$1,26^{-7}$	0,20	0,18-0,22	17b	$1,26^3$	2,00	1,79-2,24
8b	$1,26^{-6}$	0,25	0,23-0,28	18b	$1,26^4$	2,50	2,25-2,82
9b	$1,26^{-5}$	0,32	0,29-0,35	19b	$1,26^5$	3,15	2,83-3,55
10b	$1,26^{-4}$	0,40	0,36-0,44	20b	$1,26^6$	4,00	3,56-4,47

Podle normy CNN je pro ocel doporučován pouze jeden etalonový materiál, a to ocel 12 050.1. Na základě praktických zkušeností se ukazuje, že je vhodnější používat pro každou třídu obrobitelnosti jiný referenční materiál [1]. Doporučené materiály etalonů jsou uvedeny v tab. 2.

**Tab 2.** Doporučené referenční materiály [1]

Třída obrobitelnosti	18b / 1	17b / 2	16b / 3	15b / 4	14b / 5
Etalon	12 010 HB105	11 373 HB130	12 040 HB160	14 220 HB160	12 050 HB190
Třída obrobitelnosti	13b / 6	12b / 7	11b / 8	10b / 9	9b / 10
Etalon	12 050 HB250	12 060 HB250	12 060 HB280	12 061 HB280	15 330 HB350
Třída obrobitelnosti	12b / 21	12b / 22	9b / 23	8b / 24	8b / 25
Etalon	17 020	17 021	17 248	17 238	17 352

## 2.2. Zkoušky obrobiteľnosti

Pro zařazení materiálu podle obrobiteľnosti se používají různé postupy, které jsou ale založeny na stanovení relativní obrobiteľnosti materiálu, tzn. na číselném vyjádření o kolik se zkoušený materiál liší od materiálu etalonového. Metod zkoušek je celá řada, lze použít metodu výpočtovou, která však není příliš přesná, nebo můžeme stanovit obrobiteľnost materiálu na základě zkoušek obráběním. Zkoušky obráběním patří k nejčastěji využívaným metodám zjišťování obrobiteľnosti, protože nám dávají přené výsledky. Mezi tyto metody patří dlouhodobá zkouška obrobiteľnosti a krátkodobé zkoušky obrobiteľnosti, které se dále dělí na přímé a nepřímé. V následujících kapitolách se budeme zabývat metodikou těchto zkoušek.

### 2.2.1. Výpočtová metoda

Jednou z metod, umožňující stanovit obrobiteľnost materiálu je metoda výpočtová. Ta bere v úvahu mechanické vlastnosti, chemické složení, způsob výroby polotovaru nebo některé fyzikální vlastnosti materiálu. Zařazení materiálu podle tohoto výpočtu není zcela přesné, ale může být někdy postačující pro výchozí orientaci a predikci zatřídění materiálu[3]. Tento vztah má tvar (2.3):

$$K_v = \left( \frac{R_{met}}{R_{mzk}} \right)^{n_v} \quad (2.3) \quad [3]$$

tento vztah může být doplněn opravným součinitelem udávajícím např. vliv chemického složení  $i_v$  a má tento tvar (2.4) :

$$K_v = \left( \frac{R_{met}}{R_{mzk}} \right)^{n_v} \cdot i_v \quad (2.4) \quad [3]$$

Vztahy (2.3 a 2.4) platí pro ocel. Pro litinu byl sestaven výraz (2.5):

$$K_v = \left( \frac{190}{HB_{zk}} \right)^{n_v} \quad (2.5) \quad [3]$$

kde:

$R_m$  ..... mez pevnosti [MPa]

HB ..... tvrdost materiálu podle Brinella [HB]

$n_v$  ..... exponent, pro ocel  $1,25 \div 1,75$  a pro litinu  $1,7$  [-]

$i_v$  ..... opravný součinitel, pro ocel  $0,65 \div 1,2$  [-]

Hodnoty součinitele  $n_v$  a  $i_v$  pro oceli a litiny pro soustružení, frézování a vrtání jsou uvedeny v tab.3 [3].

**Tab.3** Hodnoty  $n_v$  a  $i_v$  pro stanovení obrobitelnosti oceli a litiny [3]

Materiál	soustružení		frézování		vrtání	
	$n_v$	$i_v$	$n_v$	$i_v$	$n_v$	$i_v$
Uhlíkové oceli (automatové oceli)	1,75	1,2	-	-	1,05	1,2
Uhlíkové oceli do obsahu 0,6% C	$R_m > 450 \text{ Mpa}$ 1,75	1,0	$R_m \leq 550 \text{ Mpa}$ 0,9	1,0	1,0	1,0
Uhlíkové oceli nad 0,6 % C	1,75	0,8	$R_m = 550-900 \text{ Mpa}$ 0,9	0,8	0,95	-
Uhlíkové nástrojové oceli nízkolegované $0 \geq 0,7 \%$		0,65	$R_m > 900 \text{ Mpa}$ 2,0	0,65	0,95	-
Chromové oceli	1,75	0,85	$R_m \leq 900 \text{ Mpa}$ 1,45	0,65	0,9	-
Chromové oceli nástrojové		0,65	$R_m \geq 900 \text{ Mpa}$ 2,0	0,65	0,9	-
Chromniklové oceli	1,50	0,95	$R_m \leq 900 \text{ Mpa}$ 1,35 $R_m > 900 \text{ Mpa}$ 2,0	0,9	0,9	-
Manganové oceli	1,5	0,8	$R_m \leq 900 \text{ Mpa}$ 1,0 $R_m > 900 \text{ Mpa}$ 2,0	0,75	0,9	-
Niklové oceli	1,5	1,0	$R_m \leq 900 \text{ Mpa}$ 1,0 $R_m > 900 \text{ Mpa}$ 2,0	1,0	0,9	-
Nástrojové oceli rychlořezné, žíhané na měkko	1,25	0,65	$R_m \leq 900 \text{ Mpa}$ 1,0 $R_m > 900 \text{ Mpa}$ 2,0	0,5	0,9	-
Šedá litina	1,7	-	0,95	-	1,3	-
Temperovaná litina	1,7	-	0,95	-	1,3	-

## 2.2.2. Zkoušky obráběním

Stanovení obrobitelnosti materiálu na základě zkoušek obráběním je nejlepší metoda. Mezi tyto zkoušky patří dlouhodobá zkouška a několik krátkodobých zkoušek. Zkoušky se podle normy provádí bez chlazení, s SK destičkami typu P10-P20, které mají mnohem nižší řezivost než moderní povlakované destičky z SK a tím výrazně snížíme dobu zkoušky a spotřebujeme méně materiálu. Doporučené druhy používaných nástrojů jsou uvedeny v tab.4 a doporučené řezné podmínky pro různé způsoby obrábění v tab.5.

Pro zkoušky obrobitelnosti je také nutné používat stroje s dostatečnou tuhostí a výkonem. K zajištění konstantní řezné rychlosti v průběhu celé zkoušky se doporučují stroje s plynulou změnou otáček. Tím se zlepší vyhodnocení zkoušky a dojde k úspoře materiálu.

**Tab 4.** Doporučené nástroje pro zkoušky obrobitelnosti [1]

Metoda obrábění	Doporučené nástroje
Soustružení	VBD typu SNGN 120408 nebo SPGN 120408, SK P20, průřez držáku 25x25 mm, úhel $\chi_r = 70^\circ$ (PN223850.1 nebo PN223850.2).
Vrtání	Vrták $\varnothing$ 10 mm, ČSN 221140, strojní ostření s tolerancí délky ostří 0,2 mm. Pro vrtáky se slinutým karbidem doporučen druh K10.
Frézování	Frézovací hlava PN 222462.15 nebo PN 222462.25 o průměru 125 mm, počet zubů 10. Po upnutí destiček je dovolené maximální házení axiální 0,03 mm, házení radiální 0,05 mm.

**Tab 5.** Doporučené řezné podmínky pro zkoušky obrobitelnosti [1]

Metoda obrábění	Řezné podmínky		
	Řezná rychlost (m.min <sup>-1</sup> )	Posuv (mm)	Hloubka řezu (mm)
Soustružení	80, 100, 125	0,25	2,0
VBD z SK	160, 200, 250		
Vrtání RO	12, 18, 24, 30, 35	0,12	3 D
Vrtání SK	28, 36, 44, 52, 60	0,08	2 D
Frézování	80, 110, 139	fz = 0,1 mm	2
VBD z SK	176, 220, 278		šířka frézování 0,5 D

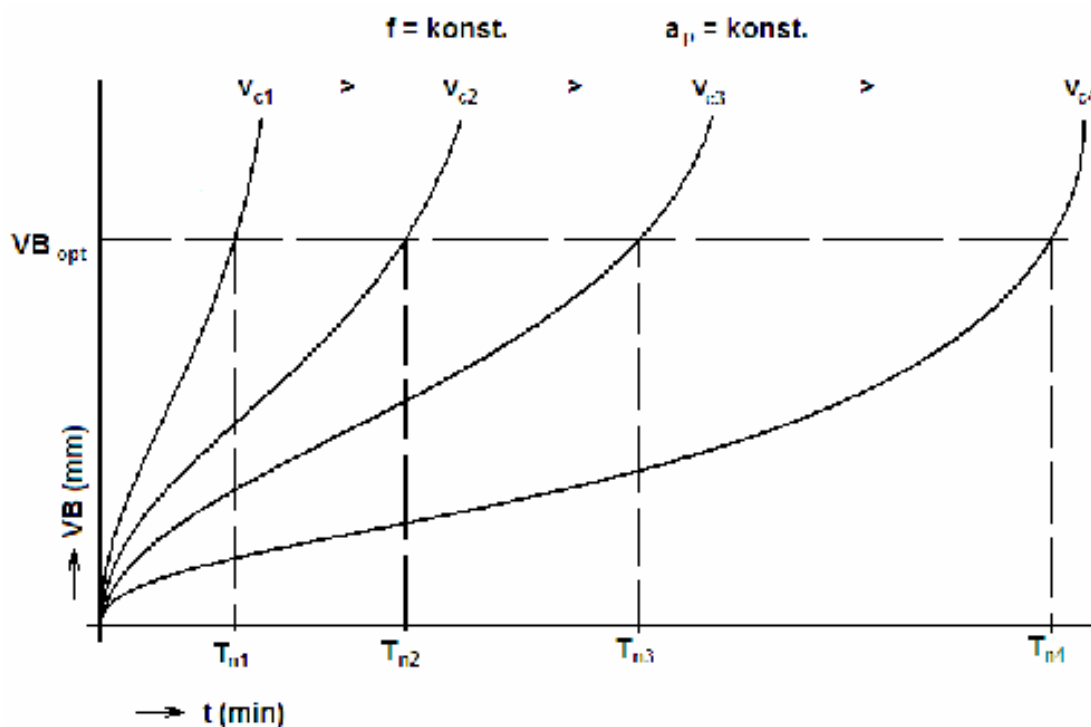
### 2.2.2.1. Dlouhodobá zkouška obrobiteľnosti

Kritérium je zde hodnota řezné rychlosti a provádí se soustružením nebo frézováním dohodnutými konstantními řeznými parametry, druhem řezného nástroje a geometrií více odstupňovanými řeznými rychlostmi až do optimálního otupení břitu[1].

Tato zkouška se považuje za základní a podle ní se posuzuje míra objektivit ostatních zkoušek obrobiteľnosti. Využívá se i k určování řezivosti nástrojů. Nevýhodou je velká spotřeba obráběného materiálu a náročnost na čas zkoušky.

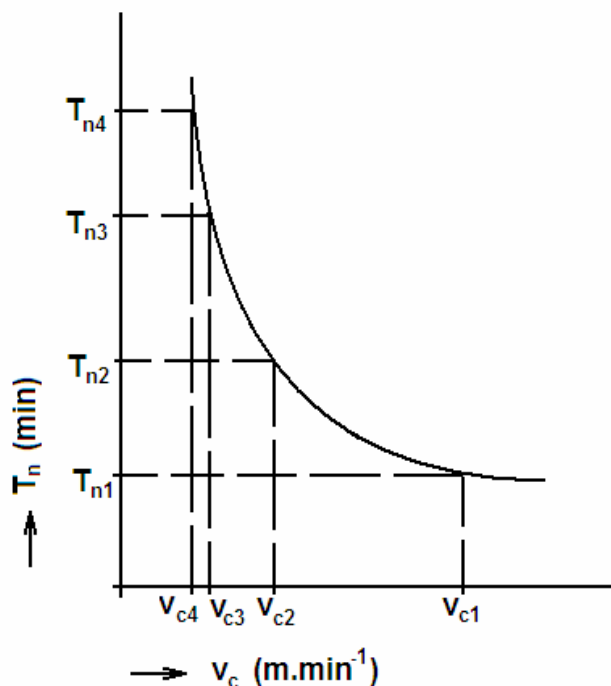
Dlouhodobá zkouška trvanlivosti se provádí podle následujících bodů:

- 1.) Změří se časový průběh opotřebení na hřbetu nástroje  $VB_B$ , pro několik hodnot při konstantních řezných parametrech a sestrojí se křivky otupení podle obr. 1



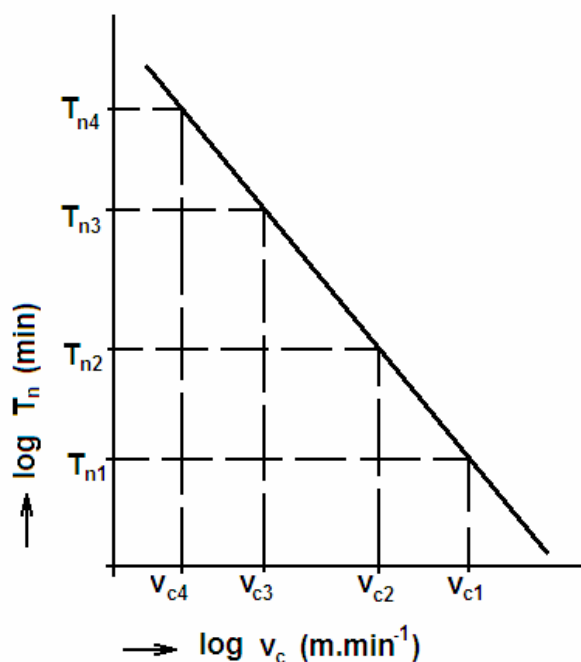
**Obr.1** Křivky otupení při proměnné řezné rychlosti,  $f = konst.$ ,  $a_p = konst$  [1]

2.) Určí se kritérium opotřebení  $VB_{opt}$  a tím se pro každou řeznou rychlost stanoví odpovídající trvanlivost břitu podle obr.2



**Obr.2** Stanovení jednotlivých trvanlivostí na základě kritéria opotřebení [1]

3.) Sestrojí se závislost  $T_n = f(v_c)$  v logaritmických souřadnicích podle obr.3.



**Obr.3** Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [1]



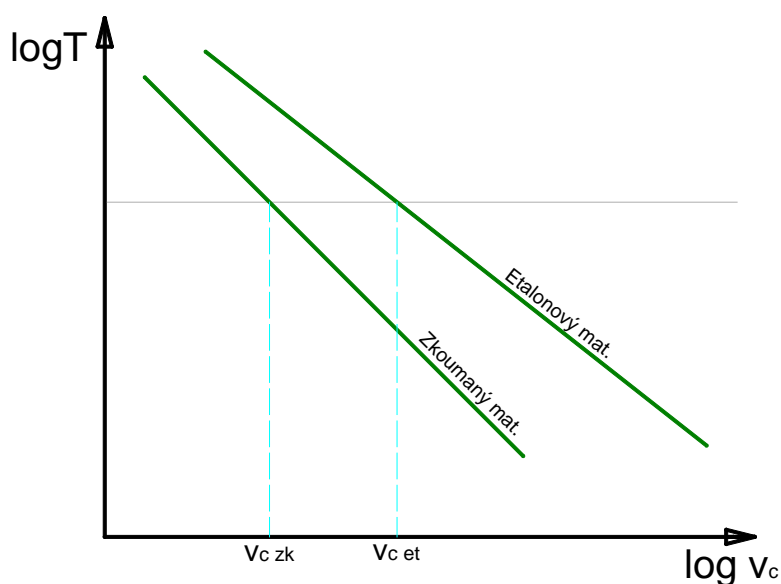
4.) Pro vybranou trvanlivost můžeme stanovit index obrobitelnosti  $K_v$  (2.6), tím že srovnáme řezné rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí etalonového materiálu podle obr.4.

$$K_v = \frac{v_{c_{zk}}}{v_{c_{et}}} \quad (2.6) \quad [1]$$

kde:

$v_{c_{zk}}$ ..... řezná rychlost při dané trvanlivosti zkoumaného materiálu [m.min<sup>-1</sup>]

$v_{c_{et}}$ ..... řezná rychlost při dané trvanlivosti etalonového materiálu [m.min<sup>-1</sup>]



**Obr. 4** Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti pro zkoumaný a etalonový materiál

#### 2.2.2.2. Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti

Krátkodobé zkoušky jsou méně objektivní, mají však výhodu v nesrovnatelně kratší době trvání a nižší spotřebě materiálu. Rychle a dostatečně přesné stanovení obrobitelnosti materiálu, zejména třískovým obráběním s definovanou řeznou geometrií břitu nástroje, je při současném bouřlivém neustále nově vyvíjených vysoce pevných, tvrdých a přitom zvláště houževnatých technických materiálů na programu dne [1].

Jsou vhodné pro rychlé roztřídění skupiny materiálu podle stupně obrobitelnosti, pro ověření eventuální změny stupně obrobitelnosti u jednotlivých dodávek stejného druhu

materiálu nebo pro rychlé určení relativního stupně obrobitelnosti z jednotlivých taveb a u nově vyvíjených materiálů [1].

Podle principu a použitého kritéria se tyto zkoušky dále dělí na přímé a nepřímé. Přímé metody jsou založeny na přímém zjišťování intenzity opotřebení za zostřených, či jinak smluvně upravených podmínek. Nepřímé metody vycházejí ze známého, resp. předpokládaného vztahu mezi opotřebením břitu a charakteristickými parametry řezného procesu. Jsou založeny převážně na zjišťování energetických parametrů. [1]

#### **Přímé metody:**

- čelní krátkodobá zkouška
- mikrozkouška obrobitelnosti
- zkouška za snížené míry opotřebení

#### **Nepřímé metody:**

- dynamická metoda
- měření tvrdosti obrobku
- mikrogeometrická metoda
- metoda porovnání tvaru třísky
- Layensetterova metoda
- metoda vrtání při konstantním tlaku
- metoda pomocí teploty řezu
- měření hloubky zpevněné vrstvy

#### **Čelní krátkodobá zkouška**

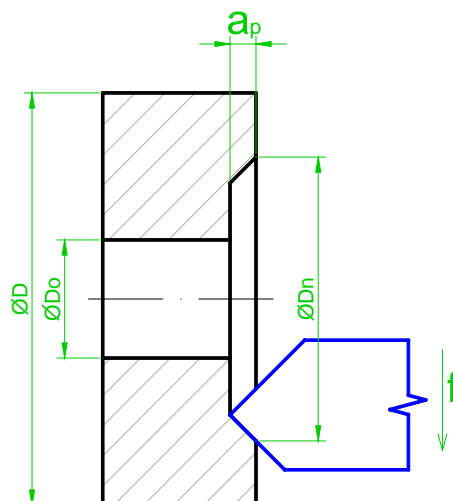
Při čelní zkoušce se soustruží mezikruží na čele disku o průměrech  $D_0$  a  $D$ . Soustruží se od průměru  $D_0$  při konstantních otáčkách, posuvu a hloubce řezu a tím narůstá řezná rychlost. Zjišťuje se, na jakém průměru  $D_n$  dosáhne nástroj předem dané velikosti opotřebení. Poté porovnáváme řezné rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí odpovídající etalonovému materiálu. Nevýhodou této metody je nutnost výroby obrobku s velkým průměrem (nad 300mm). Schéma této zkoušky znázorňuje obr.5 a index obrobitelnosti  $K_v$  vypočteme ze vztahu (2.7).

$$K_v = \frac{v_{czk}}{v_{cet}} \quad (2.7) \quad [1]$$

kde:

$v_{czk}$  ..... řezná rychlost zkoumaného materiálu [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

$v_{cet}$  ..... řezná rychlost etalonového materiálu [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]



**Obr.5** Schéma čelní zkoušky obrobitelnosti [1]

### Mikrozkouška obrobitelnosti

Na tuto zkoušku se používají pouze nástroje, jejichž funkční plochy jsou pečlivě lapovány. Tím se výrazně sníží velikost opotřebení v počáteční fázi obrábění a lze tak získat hodnoty pro sestavení závislosti  $T_n = f(v_c)$  velmi rychle při malé spotřebě obráběného materiálu [1]. Hodnota otupení na hřbetu se většinou volí  $VB_B = 0,1 \text{ mm}$ . Závislosti  $T_n - v_c$  jsou prakticky rovnoběžky.

### Zkouška za snížené míry opotřebení

Tato zkouška funguje na stejném principu jako dlouhodobá zkouška obrobitelnosti. Snížení časové náročnosti se docílí **snížením míry opotřebení**. Volí se kritérium obrobitelnosti  $v_{c5}$  (obrábění řeznou rychlostí po dobu 5 minut) a mezní míra opotřebení 0,2 až 0,3 mm. Některé prameny uvádí mezní míru opotřebení 0,1 až 0,25 mm. Podmínky při

obrábění jsou stejné jako u dlouhodobé zkoušky, přesto tato zkouška nezaručuje plnou objektivitu hodnocení indexu obrobitelnosti.

Snížené míry opotřebení dosáhneme také vhodným tepelným zpracováním, kterým **snížíme řezivost nástroje**. Tento nástroj dosahuje rychlejšího opotřebovávání v porovnání s původním nástrojem za stejných řezných podmínek. Tím dosáhneme efektu krátkodobé zkoušky. Další možností je úprava břitu nástroje volbou malého úhlu špičky a hřbetu.

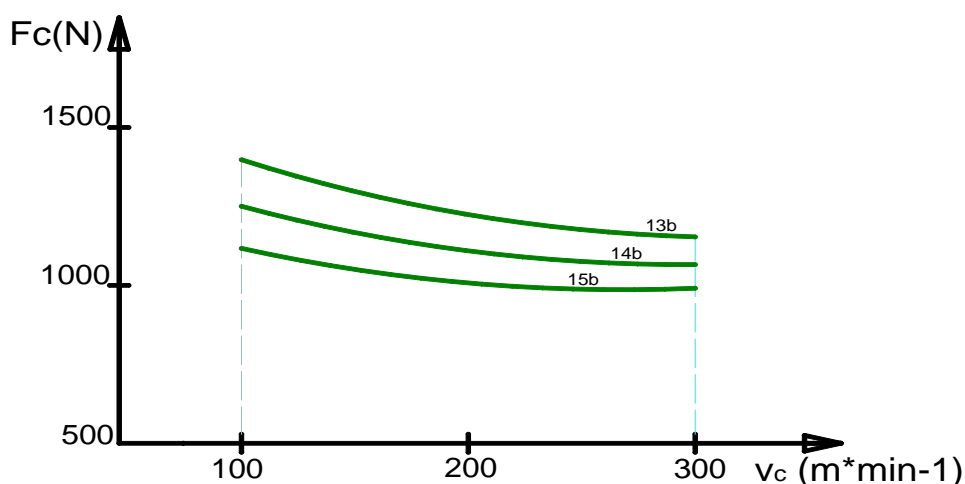
Použijeme-li **zvýšenou řeznou rychlost** než se běžně doporučuje, dosáhneme za těchto ztřeštěných řezných podmínek opět snížení trvanlivosti břitu nástroje a tím krátkodobosti zkoušky. Závislost  $T_n-v_c$  se pak extrapoluje od nižších hodnot trvanlivosti k vyšším, nebo se použije přímo nižší hodnota trvanlivosti pro relativní porovnání obrobitelnosti či řezivosti např.  $v_{c7}$  pro  $T_n=7$  min [1].

### Dynamická metoda

Podstata této metody spočívá v teoreticky dokázané a experimentálně potvrzené skutečnosti, že houževnatější (z hlediska obrobitelnosti) materiál, při jinak naprosto stejných řezných podmínkách, ale i ostatních parametrech procesu řezání, klade větší měrný řezný odpor [1].

Jestliže si předem důkladně připravenými a zodpovědně provedenými dlouhodobými zkouškami „otestujeme“ etalonový materiál s doposud, z hlediska obrobitelnosti, novým neznámým hutním materiálem, můžeme pak stanovit příslušné závislosti a porovnáním vytvořit patřičné „převodové mechanismy“, prostřednictvím, jsme pak schopni dostatečně přesně, časově i ekonomicky značně výhodněji určit obrobitelnost krátkodobou zkouškou [1].

Příklad průběhů závislosti řezné složky síly obrábění  $F_c$  na řezné rychlosti  $v_c$  jsou uvedeny na obr.6. Složky síly řezání  $F_f$  a  $F_p$  jsou méně významné a proto je nemusíme k výpočtu používat. Index obrobitelnosti  $K_v$  vyjádříme podle vztahu (2.8) [2].



**Obr. 6** Závislost řezné složky síly obrábění na řezné rychlosti [1]

$$K_v = \frac{F_{c_{et}}}{F_{c_{zk}}} \quad (2.8) \quad [1]$$

kde

$F_{c_{et}}$  ..... řezná síla při obrábění etalonového materiálu [N]

$F_{c_{zk}}$  ..... řezná síla při obrábění zkoumaného materiálu [N]

### **Měření tvrdosti obrobku**

Při této zkoušce se do materiálu vtlačí kužel z tvrdokovu a měří se průměr vtisku etalonového materiálu a zkoumaného materiálu. Výhodou této zkoušky je nenáročnost na velikost zkoumaného i etalonového materiálu a lze využít klasických tvrdoměrů. Index obrobiteľnosti se určí ze vztahu (2.9).

$$K_v = \frac{d_e}{d_{zk}} \quad (2.9) \quad [1]$$

kde

$d_e$  ..... průměr vtisku do etalonového materiálu [mm]

$d_{zk}$  ..... průměr vtisku zkoumaného materiálu [mm]

### Mikrogeometrická metoda

Tato metoda spočívá v porovnání rozdílu řezných rychlostí zkoumaného materiálu a etalonového materiálu při odpovídajících hodnotách drsnosti. Drsnost povrchu ovlivňuje plastická deformace kovu při procesu řezání a jeho nerovnoměrné pružné nabývání po odebrání třísky. Tito činitelé jsou bezprostředně spojeny s vlastnostmi obráběného kovu. Přitom můžeme zanedbat vliv nerovnoměrného odpružení, protože tvoří jen 1 až 3% z celkové výšky nerovností [2].

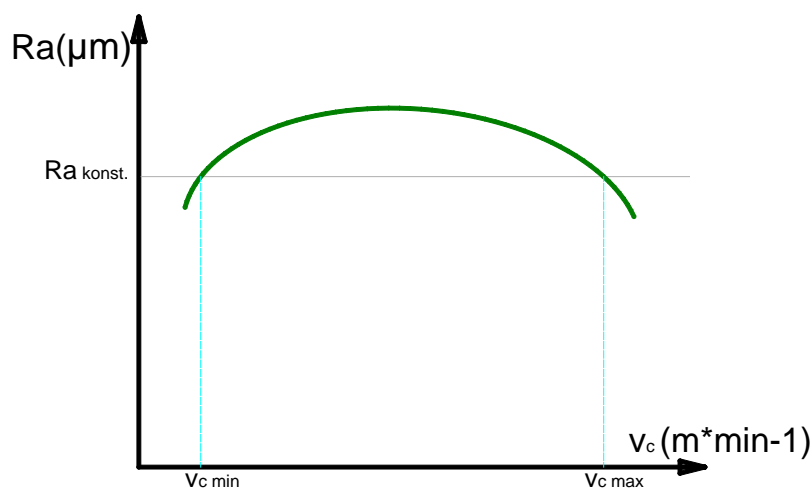
Toto měření je pouze doplňkové a nelze jej použít jako samostatné kritérium [1]. U některých materiálu je odlišná závislost mezi řeznou rychlostí a drsností  $R_a$ , jako příklad slouží obr.7. V takových případech je určení obrobitelnosti touto metodou obtížné. Index obrobitelnosti se tedy vypočítá ze vztahu (2.10). Čím větší je hodnota  $K_v$ , tím užší je pásmo řezných rychlostí s nepřijatelně velkou drsností povrchu [2].

$$K_v = \frac{(v_{cmax} - v_{cmin})_{et}}{(v_{cmax} - v_{cmin})_{zk}} \quad (2.10) \quad [1]$$

kde

$(v_{cmax} - v_{cmin})_{et}$  .....rozdíl řezných rychlostí etalonového materiálu [ $m \cdot min^{-1}$ ]

$(v_{cmax} - v_{cmin})_{zk}$  .....rozdíl řezných rychlostí zkoumaného materiálu [ $m \cdot min^{-1}$ ]



**Obr.7** Závislost řezné rychlosti na drsnosti  $R_a$  [1]

### **Metoda porovnání tvaru třísky**

Tato metoda je založena na porovnání tvaru a druhu třísky. Měří se např. poloměr svinované třísky nebo koeficient pěchování třísky u zkoumaného a etalonového materiálu za stejných řezných podmínek [1]. Na obě tyto kritéria má největší vliv geometrie nástroje a zvolené řezné parametry. Stejně jako u mikrogeometrické metody je tento parametr stanovování obrobitelnosti pouze doplňkový a nelze jej použít samostatně. Používá se nejčastěji u automatových ocelí. Index obrobitelnosti se určuje ze vztahu (2.11).

$$K_v = \frac{r_{te}}{r_{tzk}} = \frac{K_{zk}}{K_e} \quad (2.11) \quad [1]$$

kde

$r_{te}$  ..... poloměr svinované třísky etalonového materiálu [mm]

$r_{tzk}$  ..... poloměr svinované třísky zkoumaného materiálu [mm]

$K_{zk}$  ..... koeficient pěchování třísky testovaného materiálu [-]

$K_e$  ..... koeficient pěchování třísky etalonového materiálu [-]

### **Layensetterova metoda**

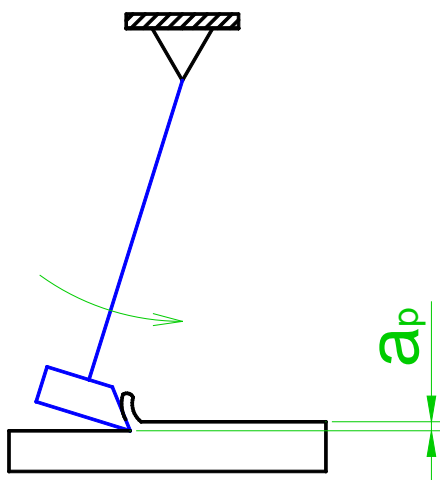
Pracuje na stejném principu jako Charpyho kladivo. Na kyvadle je připevněn nůž, který po spuštění do vzorku vyryje žlábek, tak jak ukazuje obr.8. Veličina, která charakterizuje hodnotu indexu obrobitelnosti, je délka žlábků, nebo hloubka vniknutí nože do zkoumaného a etalonového materiálu při jeho spuštění z určité výšky. Index obrobitelnosti se určí ze vztahu (2.12) [1].

$$K_v = \frac{a_{p\ zk}}{a_{p\ et}} \quad (2.12) \quad [1]$$

kde

$a_{p\ zk}$  ..... hloubka vniknutí nože do zkoumaného materiálu [mm]

$a_{p\ et}$  ..... hloubka vniknutí nože do etalonového materiálu [mm]



**Obr.8** Schéma funkce Layensetterova kladiva [1]

### **Metoda vrtání při konstantním tlaku**

Tato metoda spočívá v měření hloubky vrtaného otvoru při stejném tlaku až do úplného otupení vrtáku. Při určitém otupení přestane vrták vnikat dál do materiálu. Měří se hloubka v etalonovém materiálu a zkoumaném materiálu. Index obrobiteľnosti je dán vztahem (2.13).

$$K_v = \frac{h_{zk}}{h_e} \quad (2.13) \quad [1]$$

kde

$h_{zk}$  ..... vyvrtaná hloubka otvoru do zkoušeného materiálu [mm]

$h_e$  ..... vyvrtaná hloubka otvoru do etalonového materiálu [mm]

### **Metoda pomocí teploty řezu**

Princip metody spočívá v měření střední teploty řezání při obrábění etalonového a zkoumaného materiálu při stejných pracovních podmínkách. Tato metoda se vyznačuje poměrně vysokým stupněm objektivity [1]. Nevýhodou je, že ji lze použít při určování stupně obrobiteľnosti vždy jedné skupiny materiálu (např. uhlíkové oceli, slitiny hliníku, apod.) [1].

Zkouška se provádí za konstantních řezných parametrů a to buď metodou přirozeného termočládku, nebo pomocí termodua a to kvůli vyloučení vlivu chemického složení zkoumaného materiálu [1]. Zkoušku je vhodné provést při konstantním průřezu třísky a minimálně při třech hodnotách řezné rychlosti. Čím nižší je teplota řezání, tím lepší je



stupeň obrobitelnosti daného materiálu. Předností zkoušky je relativně malá spotřeba obráběného materiálu. Index obrobitelnosti se stanoví ze vztahu (2.14) [1].

$$K_v = \frac{\Theta_e}{\Theta_{zk}} \quad (2.14) \quad [1]$$

kde

$\Theta_e$ ..... střední teplota etalonového materiálu [°C]

$\Theta_{zk}$ ..... střední teplota zkoumaného materiálu [°C]

### **Měření hloubky zpevněné vrstvy**

Podstata této metody je v měření mikrotvrdosti zpevněné vrstvy těsně pod obrobeným povrchem etalonového a zkoumaného materiálu. Index obrobitelnosti je dán vztahem (2.15).[1]

$$K_v = \frac{HM_e}{HM_{zk}} \quad (2.15) \quad [1]$$

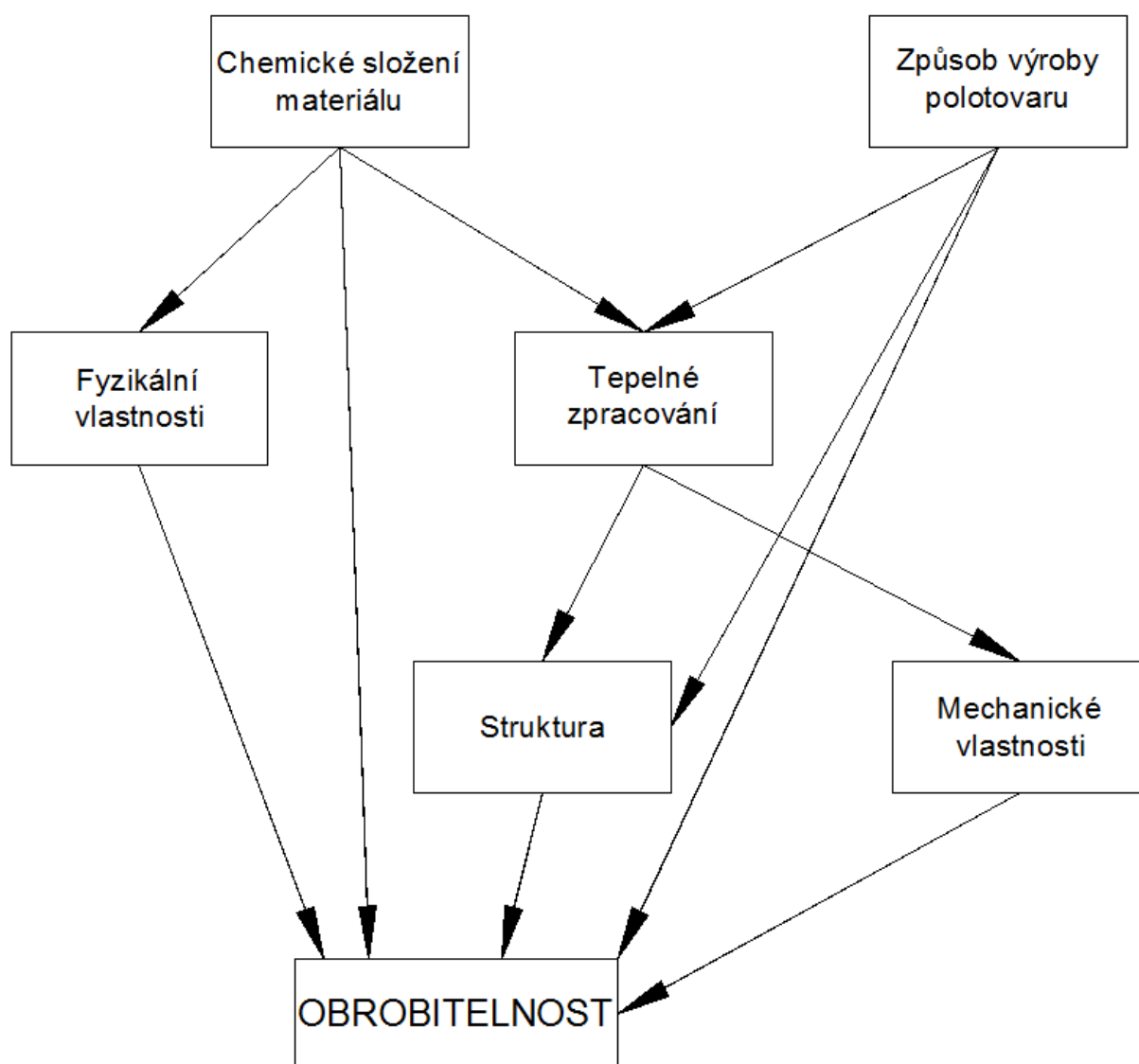
kde

$HM_e$  ..... hloubka zpevněné vrstvy etalonového materiálu [ $\mu\text{m}$ ]

$HM_{zk}$  ..... hloubka zpevněné vrstvy testovaného materiálu [ $\mu\text{m}$ ]

## 2.3. Vlivy ovlivňující obrobitelnost materiálu

Chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti, struktura obráběného materiálu a způsob výroby polotovaru podstatně ovlivňují obrobitelnost. Vzájemný vztah těchto faktorů charakterizuje obr.9 [2]. O nejdůležitějších faktorech se budu zabývat v následujících podkapitolách. Vzhledem k rozsahu této práce se budu věnovat vlivům u uhlíkových ocelí.



**Obr.9** Vzájemný vztah činitelů, které ovlivňují obrobitelnost materiálu [2]

### 2.3.1. Vliv chemického složení na obrobitelnost uhlíkových ocelí

Chemické složení ovlivňuje obrobitelnost oceli zásadním způsobem. Vliv jednotlivých prvků na obrobitelnost, z nichž některé se dostávají do oceli při metalurgickém procesu (C, Mn, Si, P, N, O, S, Pb, Cu) a další jsou přidávány pro zlepšení mechanických nebo chemických vlastností (Cr, V, W, Mo, Ti, Ni) je různý, dle toho jsou li v základní hmotě rozpustné úplně, částečně nebo zda vytvářejí tvrdé složky (karbidy, nitridy) či vměstky [3].

**Uhlík C** – oceli s malým obsahem uhlíku (do 0,15% C) jsou pro svou vazkost špatně obrobitelné. Při obrábění se tvoří velmi intenzivně nárůstek a obrobená plocha má špatnou kvalitu [4]. Oceli mají nejlepší obrobitelnost při 0,25% C. Nad 0,30% C se zvyšuje pevnost oceli a otupení roste.

**Mangan Mn** – vliv manganu na obrobitelnost souvisí s obsahem uhlíku, poněvadž Mn podporuje rozpustnost C v tekutém stavu. Optimální procento manganu v ocelích při obsahu uhlíku do 0,2% C je asi 1% Mn. Zvýšením procenta Mn se zhoršuje obrobitelnost vlivem zvýšené pevnosti a houževnatosti oceli. Při 2 až 4% Mn se snižují rekrystalizační teploty (při pozvolném ochlazování vzniká martenzit) a obrobitelnost se značně zhoršuje. Překročí-li Mn 12%, jde již o ocel austenitickou s velmi špatnou obrobitelností. [4]

**Chrom Cr** – má podobný vliv jako mangan

**Křemík Si** – na obrobitelnost ocelí má zásadně nepříznivý účinek, protože sloučeniny (npř.  $\text{SiO}_2$ ) zvyšují brusný otěr.

**Fosfor P** – až asi do 0,1% obrobitelnost zlepšujete tím, že snižuje jejich vazkost. Zvýší lámavost třísek a obrobená plocha je kvalitnější.

**Síra S** – je v oceli přítomná jako MnS nebo FeS, snižuje jejich houževnatost a napomáhá tak k vytváření lámavé třísky (automatové oceli 0,2 až 0,3% S). Snižováním houževnatosti se však zvyšuje křehkost ocelí a snižuje se vrubová houževnatost [4].

**Olovo Pb** – je výhodnější legující prvek pro automatové oceli než síra. Olovo se v železe nerozpouští, porušuje však souvislost vazkého feritu a zlepšuje obrobitelnost. Obrobitelnost se zvyšuje až od 0,5% Pb [4]. Olovo působí na vytváření krátké třísky (nutné u automatových ocelí), zvyšuje hospodárnou řeznou rychlost a zlepšuje kvalitu obrobené plochy.

### 2.3.2. Vliv struktury na obrobitelnost uhlíkových ocelí

**Ferit** – je základní strukturní součást ocelí. Je velmi měkký a tvárný. V důsledku toho se intenzivně deformuje, nalepuje na břit a podporuje vznik nárůstku. Proto má obrobený povrch špatnou kvalitu.

**Perlit** – je druhou základní složkou ocelí. Na obrobitelnost působí různě a to podle tvaru části cementitu. Obrobitelnost ocelí s lamelárním (destičkovým) perlitem je horší než s perlitem lobulárním (zrnitým), a to pro zvýšený brusný účinek lamel cementitu [4]. Teplota řezání je vyšší u globulárního perlitu, protože podporuje molekulární adhezi (nalepování třísek).

**Sorbit** – je tvrdší než perlit., a proto na obrobitelnost působí nepříznivě. Jeho vliv je tím větší, čím jemnější má zrna [4].

**Martenzit** – martenzitická struktura je pevná, tvrdá a křehká. Díky těmto vlastnostem významně zhoršuje obrobitelnost.

### 2.3.3. Vliv mechanických a fyzikálních vlastností ocelí

**Tepelné vlastnosti** – nejdůležitější je tepelná vodivost, která rozhoduje o rychlosti odvádění tepla z místa řezu. Tepelná vodivost podstatně ovlivňuje teplotu řezání, a proto jsou kovy s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti i při stejné pevnosti a tvrdosti většinou lépe obrobitelné. Při stejné trvanlivosti nástroje roste optimální řezná rychlost se zvýšením součinitele tepelné vodivosti téměř lineárně až do HB 350, potom je tento vliv poněkud utlumen [3].

**Mechanické vlastnosti** – mají vliv na energetickou bilanci procesu řezání a tím i na intenzitu opotřebení břitu, dále kvalitu obrobené plochy i tvar třísky. Obrobitelnost ocelí se zhoršuje s růstem pevnosti, tvrdosti a případně houževnatosti. Vliv tvrdosti není však rovnoměrný – pro tvrdost do HB 160 převládá působení vyšší houževnatosti a tím jsou tyto oceli relativně hůře obrobitelné. Mezi 200 – 230 HB nesleduje obrobitelnost rovněž změny tvrdosti přímo úměrně, neboť působí výrazněji další faktory (chemické složení, mikrostruktura, houževnatost). Rostoucí houževnatost obrobitelnost zhoršuje a má výraznější působení u ocelí nižších pevností. [3]

### 2.3.4. Vliv tepelného zpracování a způsobu výroby na obrobitelnost ocelí

**Tepelné zpracování** – pomocí vhodné úpravy struktury a jejich strukturních charakteristik (např. velikosti zrna), zlepšit obrobitelnost. Podle obsahu uhlíku a dalších faktorů možno hledat např. optimální velikost zrna a poměr fází ve struktuře, příznivě ovlivňující obrobitelnost [3]. Využívají se např. následující způsoby tepelného zpracování:

- žíhání ke snížení pnutí mez hrubováním a obráběním na čisto (535 až 650°C – kování)
- normalizační žíhání s ochlazením na vzduchu (snížení tvrdosti nízkouhlíkové oceli)
- žíhání základní s pomalým ochlazováním v peci (pro ocele do 0,4% C)
- žíhání na měkko (výdrž na teplotě 4-8 hod., obsah C nad 0,45%)
- izotermické žíhání (zlepšení obrobitelnosti a drsnosti povrchu ocelí pod 0,45% C)
- kalení a popouštění (vhodná struktura pro dokončovací operace při malé drsnosti)

**Způsob výroby** – ocel vyrobená v martinských pecích neobsahuje v takové míře abrazivní korundové vměstky jako elektroocel, má vyšší obsah síry, proto je lépe obrobitelná[3]. U nízkouhlíkových ocelí lze také zlepšit obrobitelnost tažením. Rozdílné výrobní podmínky, spojené s obsahem doprovodných prvků a průběhem dezoxidace, jsou příčinou vysokého rozptylu obrobitelnosti [3].

### 3. Experimentální část

Z důvodů časové náročnosti a rozsahu bakalářské práce, bylo navrženo neprovádět přímo zkoušky obrobitelnosti. Hlavním cílem bylo provést teoretický rozbor metod stanovování obrobitelnosti novými, zkrácenými zkouškami. Dále byly provedeny některé vstupní experimenty pro stanovování koeficientů obrobitelnosti. V navazujících experimentech budou obráběné materiály dále testovány a v dalších bakalářských a diplomových pracích budou publikovány výsledky těchto experimentů.

V první části experimentů bylo sledováno a měřeno několik vybraných parametrů. Konkrétně, řezné síly při soustružení, drsnosti obrobeného povrchu a tvar třísky. Měření se provádělo ve spolupráci se Žilinskou univerzitou v Žilině, katedra obrábění a výrobní techniky, na soustruhu SUI 40 o výkonu 5,5 kW. Jako testovaný materiál byly zvoleny 3 různé druhy materiálu:

- ocel 14 109 – skupina obrobitelnosti b
- mosaz CuZn40Pb2 – skupina obrobitelnosti c
- dural AlCu4PbMg – skupina obrobitelnosti d

#### 3.1. Technologické parametry

##### 3.1.1. Testované materiály

###### Ocel 14 109

Ocel chromová, na valivá ložiska. Ocel je dobře tvárná za tepla a obrobitelná. Vhodná pro výrobu ložiskových kuliček do  $\varnothing$  25 mm, válečků a kuželíků do  $\varnothing$  18 mm a kroužků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm. [8]

###### Mosaz CuZn40Pb2

Slitina mědi tvářená, pro všeobecné účely. Pro tyče (kruhové, ploché, čtvercové, 6hranné) a profily lisované za tepla a tažené za studena a pro výkovky zápustkové. Odolnost proti atmosférické korozi velmi dobrá, podléhá koroznímu praskání a odzinkování v roztocích solí a mořské vodě, neodolává amonným solím a kyanidům. Ke svařování odporem (pro jiné způsoby se nedoporučuje) a pájení vhodná. Dobrá tvářitelnost a lisovatelnost. Pro výkovky

a výlisky na armatury, šrouby, matice a jiné součásti hromadné výroby, profily pro elektrotechnické účely. [8]

### **Dural AlCu4PbMg**

Slitina hliníku tvářená, pro všeobecné účely. Pro tyče (kruhové, ploché, čtvercové, 6hranné), trubky lisované komorovou matricí, bezešvé a tažené za studena, profily. Konstrukční materiál na mechanicky značně namáhané součásti, zejména v dopravě. Vysoká pevnost docílená tepelným zpracováním. Špatná odolnost proti atmosférické korozi. Obrobitelnost velmi dobrá. Slitina nevhodná pro svařování a k eloxování. Nevhodná pro použití v potravinářství. [8]

### **3.1.2. Použitý nástroj**

Tvar a rozměry soustružnického nože a řezné destičky jsou na obrázcích 10 a 11. Parametry byly zjištěny v katalogu Pramet.

### **Řezná destička DCMT 11T304 E-UR**

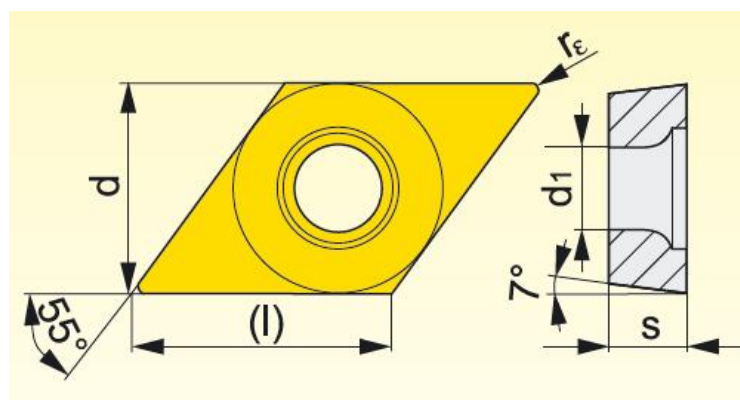
$l=11,6\text{mm}$

$d=9,525\text{mm}$

$d_1=4,4\text{mm}$

$s=3,97\text{mm}$

$r_\epsilon=0,2\text{mm}$



**Obr.10** Tvar a rozměry řezné destičky DCMT 11T304 E-UR [9]

**Soustružnický nůž DDJNR/L 2020 K11**

$$h=h_1=20\text{mm}$$

$$b=20\text{mm}$$

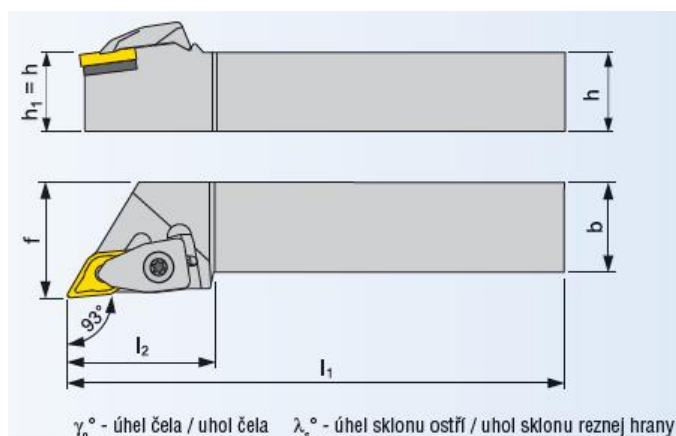
$$f=25$$

$$l_1=125\text{mm}$$

$$l_{2\max}=35\text{mm}$$

$$\gamma_0=-6^\circ$$

$$\gamma_s=-6^\circ$$



**Obr.11** Tvar a rozměry soustružnického nože DDJNR/L 2020 K11 [9]

**3.1.3. Polotovary**

Polotovary byly mosazné a duralové tyčinky o průměru 10 mm a ocelovou tyč o průměru 20 mm. Polotovary jsou zobrazeny na obr.12. Do polotovaru byly navrtány z obou stran středící dülky a byly upnuty mezi hroty.



**Obr. 12** Polotovary (shora: dural, mosaz, ocel)

**3.2. Řezná síla při soustružení**

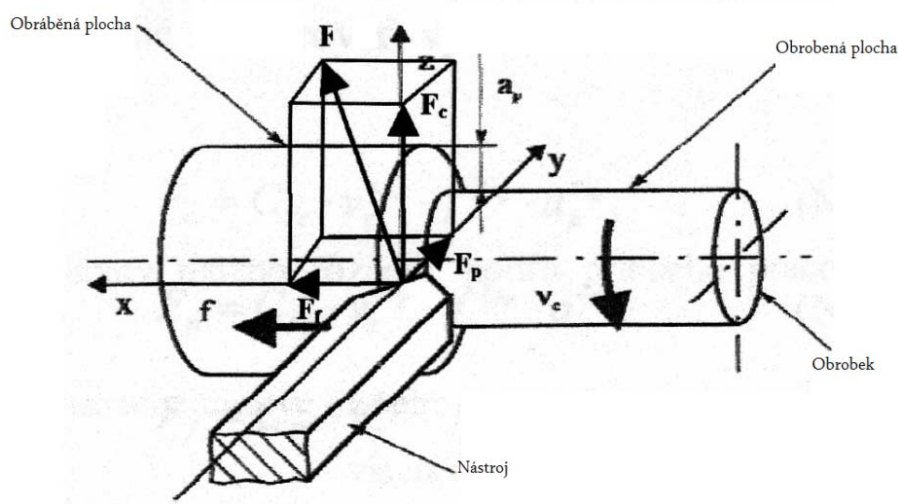
Síla řezání je dynamický jev. Při obrábění v závislosti na čase kolísá její okamžitá velikost a to i při obrábění za konstantních řezných podmínek [6]. To je způsobeno především rozptylem mechanických vlastností obráběného materiálu a mechanikou tvorby třísky. Řezná síla se rozkládá do tří složek (schéma je na obr.13):



**Složka  $F_c$**  – Vektor působí ve stejném směru jako vektor řezné rychlosti. Nazývá se hlavní řezná síla nebo tangenciální síla a má ze všech tří složek největší význam. Je základem pro formulaci omezujících podmínek při optimalizaci řezných parametrů [6].

**Složka  $F_p$**  – Nazývá se pasivní (radiální) složka řezné síly, protože vektor této síly působí v radiálním směru. Ovlivňuje průhyb obrobku a zachycuje tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek. Její poznání je vhodné při výpočtech přesnosti obráběných součástí a výpočtech tuhosti soustavy.

**Složka  $F_f$**  – Nazývá se axiální (posuvová) složka řezné síly, protože její vektor je stejný jako vektor posuvu. Její poznání se využívá pro výpočty posuvových mechanismů.



**Obr.13** Složky řezné síly při podélném soustružení [5]

Poměr velikosti jednotlivých složek síly soustružení je pro často používanou řeznou geometrii přibližně rovný  $F_c : F_p : F_f = 1 : 0,4 : 0,25$  [6]. Velikost složek řezné síly závisí na řezných parametrech ( $v_c$ ,  $a_p$ ,  $f$ ), geometrii nástroje, obráběném materiálu, řezného materiálu, řezného prostředí, atd. Celkovou řeznou sílu lze vypočítat ze vztahu (3.1).

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (3.1) \quad [5]$$

### 3.2.1. Experimentální měření složek řezné síly

V tomto měření byly měřeny řezné síly u třech druhů materiálu (dural, mosaz, ocel). Úlohou bylo sledovat složky řezné síly u jednotlivých materiálů při zadaných parametrech soustružení. Pro všechny typy materiálu byla zadána konstantní hloubka řezu  $a_p = 0,5$  mm, měnila se řezná rychlost  $v_c = 20$  a  $60$  m.min<sup>-1</sup> a posuv  $f = 0,135$  a  $0,225$  mm. K měření byl použit dynamometr KISTLER 9441, který má možnost snímat tři složky řezné síly  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$ . Všechny tři složky byly zahrnuty do vyhodnocení měření. Grafy byly zpracovány programem DasyLab a pro přehlednost grafů byl použit filtr. Výsledky měření jsou zaznamenány v přílohách.

### 3.3. Tvarování třísky

Tříska je deformovaná odřezávaná vrstva materiálu z obrobku. Při vníkaní řezného klínu do obráběného materiálu se tento materiál nejprve pružně a pak plasticky deformuje, čímž klade odpor proti vníkaní řezného klínu [7]. Při obrábění vznikají třísky **trhané** nebo **stříhané**.

#### Trhané (drobivé) třísky

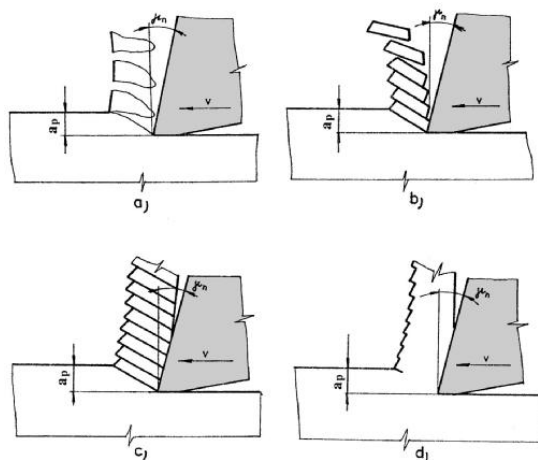
Tvoří se při obrábění tvrdých a křehkých materiálů. Vzniká vylamováním jednotlivých elementů nepravidelných tvarů bez vzájemné souvislosti [7]. Tříska má tvar nepravidelných úlomků, šupin a drobných elementů (obr.14a). Při tvorbě této třísky vzniká kvalitativně horší obrobený povrch obrobku.

#### Stříhané třísky

a) **Plynulá** – Nejčastější druh stříhané třísky (obr. 14d). Vzniká u obrábění tvárných materiálů. Elementy mají velkou soudržnost a jsou od sebe těžko rozlišitelné. Plynulá tříska odchází po čele nástroje ve tvaru šroubovice jako souvislý celek.

b) **Stupňovitá** – Skládá se z jednotlivých spolu spojených elementů, lišící se od sebe tvarem i velikostí (obr.14c). Tato tříska vzniká při obrábění tvrdých a tvárných materiálů. Stupňovitá tříska odchází po čele nástroje v kratších celcích, které jsou složeny z jedné nebo více částic. Mají tvar různě tvarovaných pásků (šroubovice, kroužky, obloučky,...).

c) **Elementová** – Tříška se skládá z postupně odstříhnutých částic, které jsou od sebe snadno rozlišitelné (obr. 14b).




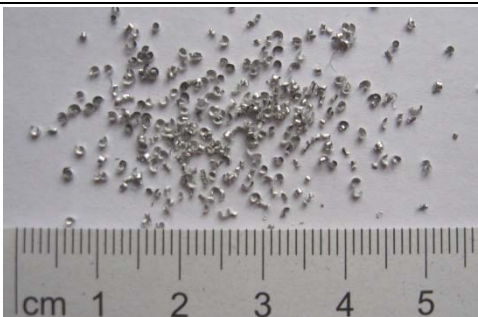


**Obr.14** Třísky trhané a stříhané [7]

### 3.3.1. Vzniklé tvary třísek při experimentech





Při různých parametrech řezání se u každého materiálu změnil tvar třísky. Všechny tvary třísky a řezné parametry jsou zobrazeny v tabulkách 6, 7 a 8.

**Tab. 6** Tvar třísky u duralu při měnících se řezných parametrech

$a_p=0,5\text{mm}$	$v_c=20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	$v_c=60\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
$f=0,135\text{ mm}$		
$f=0,225\text{ mm}$		





U duralu vznikala krátká vinutá tříška. Při  $f = 0,135\text{ mm}$  měla tříška největší poloměr. Se zvyšujícím se posuvem byla tříška drobnější.

**Tab. 7** Tvar třísky u mosazi při měnících se řezných parametrech

$a_p=0,5\text{mm}$	$v_c=20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	$v_c=60\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
$f=0,135\text{ mm}$		
$f=0,225\text{ mm}$		

U mosazi vznikala elementární tříska. Největší elementy vznikaly při  $f = 0,135\text{ mm}$  a  $v_c = 20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Se zvyšující se řeznou rychlostí a posuvem byly elementy drobnější.

**Tab. 8** Tvar třísky u oceli při měnících se řezných parametrech

$a_p=0,5\text{mm}$	$v_c=20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	$v_c=60\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$
$f=0,135\text{ mm}$		
$f=0,225\text{ mm}$		

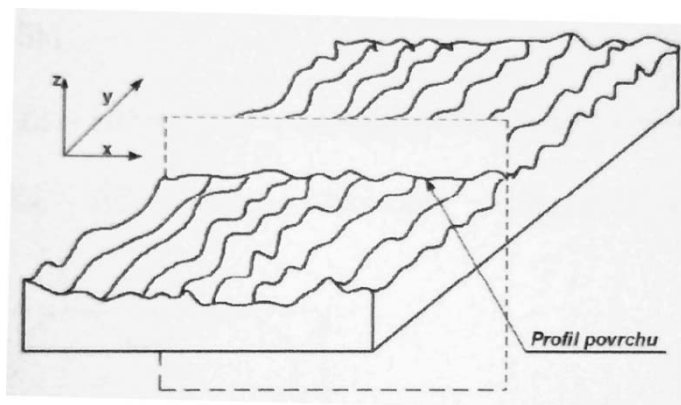
U oceli vznikaly většinou vinuté krátké třísky. Při řezné rychlosti  $v_c = 20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  vznikala drobnější tříska. Při zvýšení řezné rychlosti se poloměr a délka třísky zvětšovaly.

### 3.4. Drsnost povrchu obrobku

Podle normy ČSN EN ISO 4287 je drsnost povrchu definována jako část geometrických odchylek s relativně malou vzdáleností nerovností. Tím se odlišuje od makrogeometrie a vlnitosti povrchu. [5]

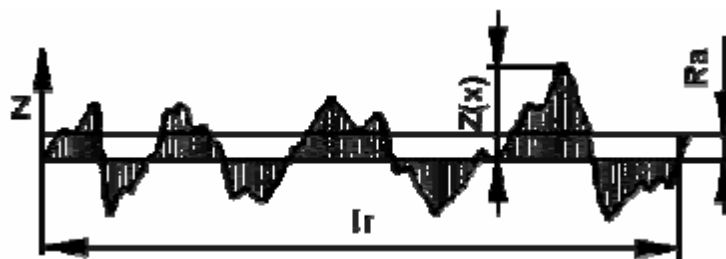
Obrobená plocha se tvoří jako obalová plocha trajektorií pracovního pohybu řezné hrany (obr. 15). Obrobenou plochu charakterizuje mikrogeometrie, která má velký význam v budoucí funkčnosti této plochy. Mikrogeometrie povrchu závisí především na řezných podmínkách

a geometrii řezné části nástroje. Na drsnost povrchu má vliv posuv, řezná rychlost, vznik nárůstku, velikost úhlu hřbetu, poloměr zaoblení hrotu nástroje  $r_\epsilon$ , mikrostruktura, otupení nástroje, apod.



**Obr. 15** Skutečný povrch obrobku [5]

V experimentech byla měřena **střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$** . Je to aritmetický průměr absolutních hodnot  $Z(x)$  v rozsahu základní délky  $l_r$ . Tato hodnota nevypovídá zcela přesně o dané drsnosti, protože  $R_a$  nereaguje citlivě na extrémní výšky a hloubky měřeného profilu [7]. Výpočet  $R_a$  určuje vztah 3.2 a schéma je znázorněno na obr.16



**Obr.16** Parametr drsnosti  $R_a$  [7]

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (3.2) \quad [7]$$

kde:

$l_r$ ..... délka ve směru osy x

$Z(x)$ ..... výška profilu v libovolné poloze x

### 3.4.1. Naměřené hodnoty drsnosti Ra při experimentech

Na obrobených vzorcích byla naměřena drsnost přístrojem Hommel Tester T2000. Přístroj je vyobrazen na obrázku 17. Výsledky drsností pro měnící se řezné parametry jsou v tabulce 9.



**Obr.17** Drsnoměr Hommel Tester T2000

**Tab.9** Hodnoty drsnosti Ra pro dané řezné parametry

$v_c$ (m.min-1)	20		60	
f (mm)	0,135	0,225	0,135	0,225
Mosaz	1,2	2,6	1,7	3,8
Dural	1,7	4,4	1,7	4,4
Ocel	2,9	5,4	1,9	5,7



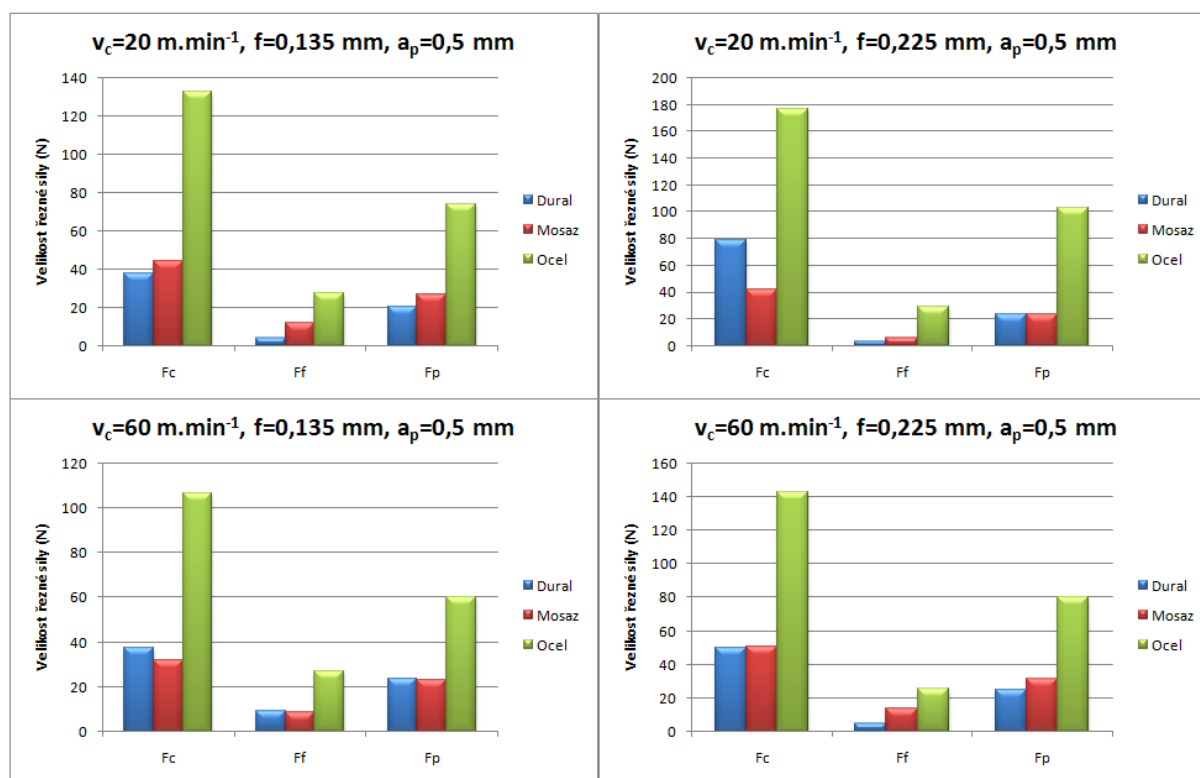
## 4. Vyhodnocení experimentů

### 4.1. Řezné síly

V tabulce 10 jsou zaznamenány střední hodnoty složek řezné síly pro jednotlivé materiály a měnící se řezné parametry. Grafické vyhodnocení je znázorněno na obr. 18.

**Tab.10** Střední hodnoty složek řezné síly

Řezné podmínky		Dural			Mosaz			Ocel		
$v_c$ (m.min <sup>-1</sup> )	f (mm)	$F_c$ (N)	$F_f$ (N)	$F_p$ (N)	$F_c$ (N)	$F_f$ (N)	$F_p$ (N)	$F_c$ (N)	$F_f$ (N)	$F_p$ (N)
20	0,135	38,1	4	20,6	44,6	12	27,2	133	27,6	74,2
20	0,225	78,6	3,75	23,4	42,5	6,4	23,3	176,7	29,5	103,1
60	0,135	37,6	9	23,8	31,9	8,6	23,2	106,7	26,8	60
60	0,225	50	4,6	25,2	50,7	13,6	31,3	142,7	25,3	80,5



**Obr. 18** Grafické znázornění středních hodnot složek řezné síly

### Vyhodnocení měření řezných sil

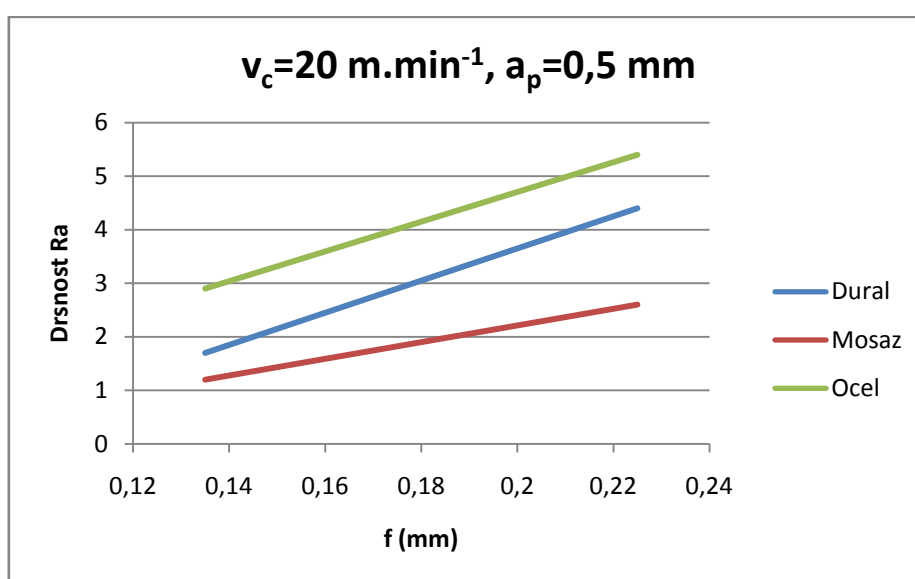
Z grafických záznamů složek řezných sil (viz. příloha), je vidět jejich dynamický průběh. Z nich byly určeny střední hodnoty  $F_c$ ,  $F_p$  a  $F_f$ , které jsou uvedeny v tabulce 10. Z obr.18 jde vidět, že při soustružení oceli byly síly přibližně 3-4x větší než u mosazi a duralu. U duralu a mosazi byly v řezných silách malé rozdíly v závislosti na řezných podmínkách.

## 4.2. Drsnost obrobené plochy

V tab.11 jsou naměřené hodnoty drsnosti  $R_a$  pro dané parametry. Grafické vyhodnocení drsnosti  $R_a$  je znázorněno na obr. 19 a 20.

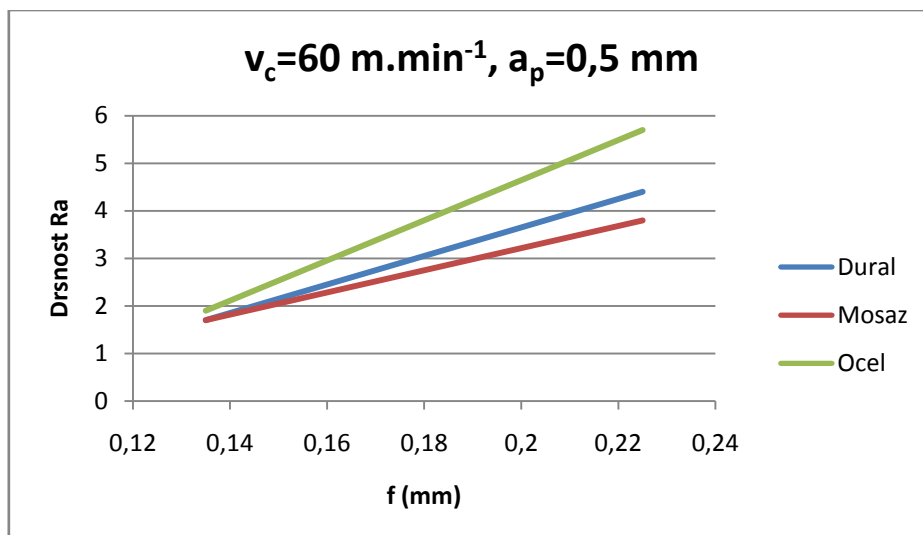
**Tab.11** Hodnoty drsnosti  $R_a$  pro dané řezné parametry

$v_c$ (m.min <sup>-1</sup> )	20		60	
$f$ (mm)	0,135	0,225	0,135	0,225
Mosaz	1,2	2,6	1,7	3,8
Dural	1,7	4,4	1,7	4,4
Ocel	2,9	5,4	1,9	5,7



**Obr. 19** Závislost drsnosti  $R_a$  na posuvu  $f$  pro dané řezné podmínky





**Obr. 20** Závislost drsnosti Ra na posuvu f pro dané řezné podmínky

### Vyhodnocení měření drsnosti

Z grafických záznamů (obr.19 a 20) je vidět že největší drsnost v závislosti na posuvu vzniká u oceli, dále pak u duralu a nejmenší hodnoty drsnosti se projevovaly u mosazi. Dále se potvrdil fakt, že se zvětšujícím se posuvem roste drsnost obrobené plochy.

## 5. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá obrobiteľností technických materiálů. V první části práce jsou popsány normativy obrobiteľnosti. V těchto normativních je rozdělení různých technických materiálů do skupin, zařazování materiálů do tříd podle indexu obrobiteľnosti  $K_v$ , etalonové materiály pro ocel a litinu, apod.

Další část se zabývá zkouškami obrobiteľnosti. Zkoušek obrobiteľnosti je celá řada, avšak všechny nejsou stejně objektivní. Mezi základní patří dlouhodobá zkouška obrobiteľnosti, podle které se určuje míra objektivnosti ostatních zkoušek a lze ji využít i u zkoušek řezivosti. Jako další se používají krátkodobé zkoušky, které jsou sice méně objektivní, ale mají výhodu v kratší době trvání zkoušky a nižší spotřebě materiálu. Tyto zkoušky se dělí na přímé (zjišťování intenzity opotřebení břitů při smluvně upravených podmínkách) a nepřímé (založeny převážně na zjišťování energetických parametrů). Dále lze pro oceli a litiny použít výpočtovou metodu, která bere v úvahu chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti a způsob výroby polotovaru. Tato metoda není příliš přesná, ale někdy je dostačující pro přibližné zařazení materiálu do třídy obrobiteľnosti.

Dále jsou popsány vlivy působícími na obrobiteľnost materiálu. Mezi tyto vlivy patří chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti, struktura obráběného materiálu a způsob výroby polotovaru. Následně byly popsány tyto faktory u uhlíkových ocelí.

V experimentální části byly provedeny vstupní experimenty pro stanovení koeficientu obrobiteľnosti u krátkodobých zkoušek. V první části experimentů byly sledovány řezné síly při soustružení, drsnosti obrobeného povrchu a tvar třísky. Jako vzorky byly tři různé materiály, z nichž každý patří do jiné skupiny obrobiteľnosti: Ocel 14 109, Mosaz  $CuZn40Pb2$  a Dural  $AlCu4PbMg$ . Při měření řezných sil byla naměřena nejvyšší hodnota u oceli. U duralu a mosazi byly v řezných silách malé rozdíly v závislosti na řezných podmínkách. Při měření drsnosti měla největší drsnost obrobené plochy opět ocel, dále pak dural a nejmenší drsnost byla u mosazi. Z měření lze usoudit, že z těchto materiálů je nejhůře obrobiteľná ocel. Dural a mosaz jsou na tom víceméně stejně, protože se velikosti řezných sil a drsnosti obrobeného povrchu příliš nelišily.

## Seznam použité literatury

- [1] NESLUŠAN, M. – TUREK, S. – BRYCHTA, J. – ČEP, R. – TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilinská univerzita v Žilině/EDIS-vydavateľstvo ŽU, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8
- [2] BUDA, J. – BÉKÉS, J. *Teoretické základy obrábania kovov*. Alfa: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1977. 696 s.
- [3] BUMBÁLEK, L. – KOLEKTIV AUTORŮ. *Obrobitelnost strojírenských materiálů*. Strojírenská technologie-knihovnička, 1998. ISBN 80-7044-232-8
- [4] PŘIKRYL, Z. – MUSÍLKOVÁ, R. *Teorie obrábění*. Sntl/Alfa, 1982.
- [5] OČENÁŠOVÁ, L. *Identifikácia obrábitelnosti materiálu ADI 1000 (Diplomová práca)*. Žilinská univerzita v Žilině. 2004.
- [6] HAVRILA, M. – BRYCHTA, J. *Top trendy v obrábání – 1.část-Obrábané materiály*. Media/st s.r.o., 2006.
- [7] BRYCHTA, J. - ČEP, R. - NOVÁKOVÁ, J. - PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II - 1. díl*. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [8] *Ferona-Materiálové normy* [online]. [cit.2009-04-23]. Dostupný z WWW: <[http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)>.
- [9] *Pramet-Katalog* [online]. [cit.2009-04-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.pramet.com/download/katalog/pdf/Turning%202009%20CZSK%20screen.pdf>>

## Seznam příloh

**Příloha 1:** Grafické znázornění složek řezné sily při soustružení duralu

**Příloha 2:** Grafické znázornění složek řezné sily při soustružení mosazi

**Příloha 3:** Grafické znázornění složek řezné sily při soustružení oceli

### **PODĚKOVÁNÍ**

Na závěr bych chtěl poděkovat vedoucí diplomové práce Ing. Lence Očenášové, Ph.D.,  
za odborné rady, připomínky a pomoc při zpracování této bakalářské práce.